

**VŠB – Technická univerzita Ostrava**  
**Fakulta elektrotechniky a informatiky**

# **DIPLOMOVÁ PRÁCE**

**2012**

**Bc. Roman Bogocz**

**VŠB – Technická univerzita Ostrava  
Fakulta elektrotechniky a informatiky  
Katedra elektroenergetiky**

**Rekonstrukce hydrogenerátoru  
Českomoravská-Kolben a.s.,  
Praha-Vysočany, r.v.1925**

**Reconstruction of hydrogenerator  
Českomoravská-Kolben a.s., Praha-  
Vysočany, y.p. 1925**

VŠB - Technická univerzita Ostrava  
Fakulta elektrotechniky a informatiky  
Katedra elektroenergetiky

## Zadání diplomové práce

Student: **Bc. Roman Bogocz**  
Studijní program: N2649 Elektrotechnika  
Studijní obor: 3907T001 Elektroenergetika  
Téma: **Rekonstrukce hydrogenerátoru Českomoravská-Kolben a.s., Praha-Vysočany, r.v. 1925**  
**Reconstruction of hydrogenerator Českomoravská-Kolben a.s., Praha-Vysočany, y.p. 1925**

Zásady pro vypracování:

1. Úvod
  2. Původní provedení alternátoru
  3. Provedení alternátoru po rekonstrukci
  4. Návrh statorového vinutí
  5. Elektromagnetický výpočet
  6. Návrh budícího vinutí
  7. Závěr
- Výkresová dokumentace

Seznam doporučené odborné literatury:


- [1] KOPYLOV, I.P.: Stavba elektrických strojů, SNTL Praha, 1988  
[2] BOLDEA, I.: Synchronous generators, CRC Taylor & Francis

Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.


Vedoucí diplomové práce: **doc. Ing. Pavel Hrbáč, Ph.D.**

Datum zadání: 30.11.2011

Datum odevzdání: 04.05.2012

  
prof. Ing. Stanislav Rusek, CSc.  
*vedoucí katedry*

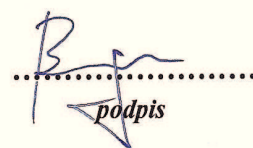


  
prof. RNDr. Václav Snášel, CSc.  
*děkan fakulty*

**Prohlášení:**

**„Místopřísežně prohlašuji že jsem předloženou diplomovou práci vypracoval samostatně a uvedl jsem všechny literární prameny a publikace, ze kterých jsem čerpal.“**

**V Orlové      dne:    4.5. 2012**



podpis

**Poděkování:**

**Na tomto místě bych rád poděkoval svému vedoucímu diplomové práce, panu doc. Ing. Pavlu Hrbáčovi, Ph.D., za rady, konzultace a připomínky, které mi byly nápomocny při tvorbě této práce.**

**Abstrakt:**

Tato diplomová práce se věnuje návrhu rekonstrukce a modernizace generátoru poháněného Francisovou turbínou na vodní elektrárně. Během zpracovávání diplomové práce, mi byl umožněn přístup k jednotlivým částem generátoru v průběhu realizace jeho opravy, za účelem získání potřebných informací o dimenzích stroje a dalších dat nezbytných pro výpočet a návrh rekonstrukce. Původní stroj byl vyroben na začátku minulého století a nebyl dosud opravován. Podnětem k rekonstrukci je navýšení výkonu a zvýšení účinnosti stroje. Uvedený návrh maximálně využívá jak moderních izolačních materiálů pro rotorové a statorové vinutí, tak i výrazně kvalitnější ocel pro magnetický obvod statoru stroje.

**Klíčová slova:**

Generátor, stator, rotor, vinutí, magnetický obvod, drážka, zub, pól, izolační systém, reaktance, vodivost, napětí, proud

**Abstract:**

This thesis solves reconstruction and modernization of Francis turbine driven generator on hydroelectric power plant. During the processing of the thesis, I've had access to individual parts of generator, also during the execution of repairs, in order to obtain the necessary information about dimensions of the machine and the other data necessary for calculation and reconstruction design. The original machine was made at the beginning of last century and has not been repaired. The reason for the reconstruction is improve performance and increase machine efficiency. The design maximizes modern isolation materials for the rotor and stator windings, as well as much higher quality steel for the magnetic circuit of the stator machine.

**Key words:**

Generator, stator, rotor, winding, magnetic circuit, slot, tooth, pole, isolation system, reactance, conductivity, voltage, current

## Seznam použitých symbolů a značek:

| Symbol               | Název   | Jednotka              |
|----------------------|---|-----------------------|
| a                    | počet paralelních větví vinutí                                  |                       |
| a                    | rozměry vinutí  | [m]                   |
| B                    | magnetická indukce  | [T]                   |
| b                    | rozměry vinutí  | [m]                   |
| b <sub>s</sub>       | šířka radiálních kanálů   | [m]                   |
| c                    | součinitel  |                       |
| D                    | průměr  | [m]                   |
| d                    | průměr  | [m]                   |
| F                    | magnetické napětí   | [A]                   |
| f                    | frekvence   | [Hz]                  |
| H                    | intenzita magnetického pole                                     | [A.m <sup>-1</sup> ]  |
| h                    | výška   | [m]                   |
| I                    | proud   | [A]                   |
| I <sub>k</sub>       | zkratový proud  | [A]                   |
| I <sub>nf</sub>      | jmenovitý proud   | [A]                   |
| k                    | činitel   |                       |
| k <sub>c</sub>       | Carterův činitel  |                       |
| k <sub>f</sub>       | činitel sycení  |                       |
| k <sub>r</sub>       | činitel rozlohy vinutí  |                       |
| k <sub>v</sub>       | činitel vinutí  |                       |
| k <sub>y</sub>       | činitel kroku   |                       |
| L                    | celková délka   | [m]                   |
| l                    | délka   | [m]                   |
| l <sub>Fe</sub>      | délka železa  | [m]                   |
| l <sub>i</sub>       | ideální délka   | [m]                   |
| m                    | počet fází stroje   |                       |
| m                    | hmotnost  | [kg]                  |
| N                    | počet závitů  |                       |
| n                    | otáčky  | [min <sup>-1</sup> ]  |
| n <sub>s</sub>       | počet radiálních kanálů   |                       |
| P                    | činný výkon   | [W]                   |
| p                    | počet pólových dvojic   |                       |
| ΔP                   | ztráty  | [W]                   |
| ΔP <sub>1.0/50</sub> | měrné elektrické ztráty elektrotechnických plechů při 1T a 50Hz | [W.kg <sup>-1</sup> ] |
| Q                    | počet drážek  |                       |
| Q <sub>p</sub>       | pólová rozteč počtu drážek                                      |                       |
| q                    | počet drážek na pól a fázi                                      |                       |
| R                    | odpor   | [Ω]                   |
| S                    | zdánlivý výkon  | [V.A]                 |
| t <sub>d</sub>       | drážková rozteč   | [mm]                  |

|                |                                     |                                       |
|----------------|-------------------------------------|---------------------------------------|
| U              | napětí                              | [V]                                   |
| v              | rychlost                            | [m.s <sup>-1</sup> ]                  |
| X              | reaktance                           | [Ω]                                   |
| y <sub>d</sub> | krok vinutí                         |                                       |
| α              | činitel pólového krytí              |                                       |
| δ              | velikost vzduchové mezery           | [m]                                   |
| ε              | zkrácení kroku                      | [p.j.]                                |
| η              | účinnost                            | [p.j.]                                |
| Λ              | činitel magnetické vodivosti        |                                       |
| μ <sub>0</sub> | permeabilita vakua                  | [H.m <sup>-1</sup> ]                  |
| v              | řád vyšší harmonické                |                                       |
| v              | zkratový poměr                      | [p.j.]                                |
| ξ              | činitel                             |                                       |
| ρ              | rezistivita                         | [Ω.mm <sup>2</sup> .m <sup>-1</sup> ] |
| σ              | proudová hustota                    | [A.m <sup>-2</sup> ]                  |
| τ <sub>d</sub> | pólová rozteč                       | [mm]                                  |
| Φ              | magnetický tok                      | [Wb]                                  |
| Φ <sub>s</sub> | rozptylový magnetický tok           | [Wb]                                  |
| φ              | fázový posun mezi napětím a proudem | [rad(°)]                              |

## INDEXY

|     |                              |
|-----|------------------------------|
| b   | budící                       |
| Cu  | měděný                       |
| c   | čelo                         |
| d   | drážka                       |
| d   | podélný                      |
| e   | vnější                       |
| Fe  | železný                      |
| f   | fázový                       |
| j   | jho                          |
| k   | nakrátko                     |
| min | minimální                    |
| n   | jmenovitý                    |
| n   | nástavec                     |
| o   | naprázdno                    |
| p   | pól                          |
| q   | příčný                       |
| r   | rotor                        |
| s   | stator                       |
| v   | vodič                        |
| z   | zub                          |
| l   | statorový                    |
| δ   | týkající se vzduchové mezery |
| σ   | rozptylový                   |



## **OBSAH:**

|   |    |
|---|----|
| 1 Úvod  | 9  |
| 2 Původní provedení alternátoru               | 10 |
| 3 Provedení alternátoru po rekonstrukci       | 11 |
| 4 Návrh statorového vinutí                    | 15 |
| 4.1 Výpočet průřezu vodiče statorového vinutí | 16 |
| 4.2 Tingleyho schéma vinutí                   | 18 |
| 5 Elektromagnetický výpočet                   | 19 |
| 5.1 Výpočet rozměrů statoru                   | 19 |
| 5.2 Drážka statoru                            | 20 |
| 5.3 Zub statoru                               | 21 |
| 5.4 Charakteristika naprázdno                 | 23 |
| 5.5 Ohmický odpor statorového vinutí          | 29 |
| 5.6 Rozptylová reaktance statorového vinutí   | 30 |
| 5.7 Reakce kotvy                              | 33 |
| 5.8 Výpočet charakteristiky nakrátko          | 35 |
| 6 Návrh budícího vinutí                       | 37 |
| 6.1 Stanovení buzení                          | 37 |
| 6.2 Výpočet budícího vinutí                   | 39 |
| 6.3 Hmotnosti aktivních částí stroje          | 40 |
| 6.4 Určení ztrát a účinností                  | 42 |
| 7 Závěr                                       | 44 |
| Literatura                                    | 45 |
| Seznam příloh a výkresové dokumentace         | 46 |

# 1 Úvod

Tématem této diplomové práce je návrh rekonstrukce hydrogenerátoru. Cílem rekonstrukce je modernizace stroje, zejména navýšení výkonu a zvýšení účinnosti. Uvedená problematika je v této době velmi aktuální. Vždyť modernizace obnovitelných zdrojů elektrické energie je velmi frekventovaným tématem.

V prvních dvou kapitolách je popsán původní a navrhovaný stav a je zde rovněž uveden rozsah rekonstrukce stroje.

Práce je rozdělena do několika kapitol tak, aby byla zachována posloupnost výpočtů, s tím, že jsou průběžně doplňovány o teoretické znalosti z oblasti stavby a návrhu elektrických strojů. Dále je text pro ilustraci doplněn několika vybranými fotografiemi dokumentujícími průběh opravy skutečného stroje.

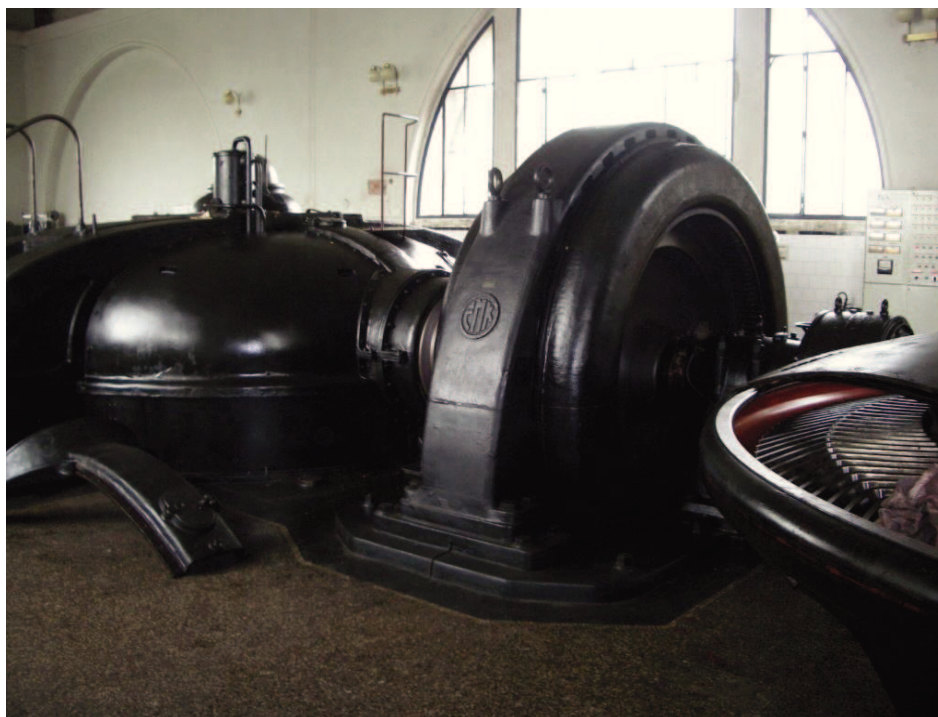
Přílohy tvoří výkresová dokumentace spolu s grafy a schémata.

## 2 Původní provedení alternátoru

Jedná se o horizontální synchronní generátor, který je přes pružnou spojku připojen k úhlové převodovce poháněné Francisovou turbínou. Rotor je uložen v kluzných ložiscích a má 20 pólů. Generátor byl vyroben firmou Českomoravská Kolen a.s. Praha Vysočany, typové označení stroje je NGT 251/36x20. Původní vinutí bylo dvouvrstvé, všívané s uzavřenou drážkou. Na hřídeli rotoru byl rotační budič.

### Technické parametry generátoru před rekonstrukcí:

|                                    |   |
|------------------------------------|---|
| činný výkon                        | $P_n = 680 \text{ kW}$                    |
| zdánlivý výkon                     | $S = 850 \text{ kVA}$                     |
| jmenovité otáčky                   | $n = 300 \text{ min}^{-1}$                |
| účinník                            | $\cos \varphi = 0,8$                      |
| napětí                             | $U_s = 6,6 \text{ kV}$                    |
| vnitřní průměr magnetického obvodu | $D = 2212 \text{ mm}$                     |
| vnější průměr magnetického obvodu  | $D_e = 2510 \text{ mm}$                   |
| délka magnetického obvodu          | $l = 256,5 \text{ mm}$                    |
| chlazení                           | vzduchové, nucenou cirkulací              |
| buzení                             | rotační na hřídeli generátoru, 115V, 120A |



*Obr.č.1 Původní provedení stroje*

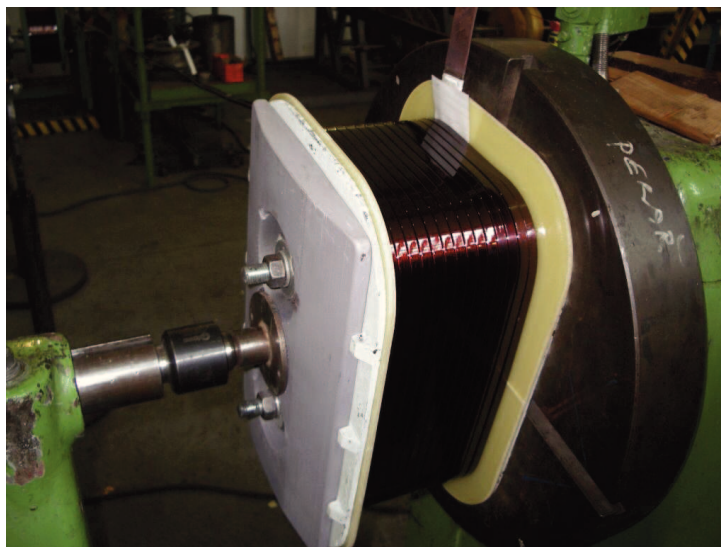
### 3 Provedení alternátoru po rekonstrukci

Rekonstrukce bude zahrnovat zejména nové vinutí pólů rotoru, vinutí statoru, nový magnetický obvod statoru, nové buzení a rekonstrukci ložisek. Rotorové těleso, jádra pólů a pólové nástavce zůstávají původní, s tím, že navrhuji provést:

- egalizaci všech funkčních ploch hřídele rotoru
- defektoskopii konstrukce rotoru i statoru
- dynamické vyvážení rotoru (na pozici stroje)
- čištění a nátěr magnetového kola a statorového tělesa
- měření čelní a obvodové házivosti brzdě dráhy



*Obr.č.2 Magnetové kolo rotoru*



*Obr.č.3 Navljení rotorové cívky*



*Obr.č.4 Navinutý pól rotoru připravený k montáži*

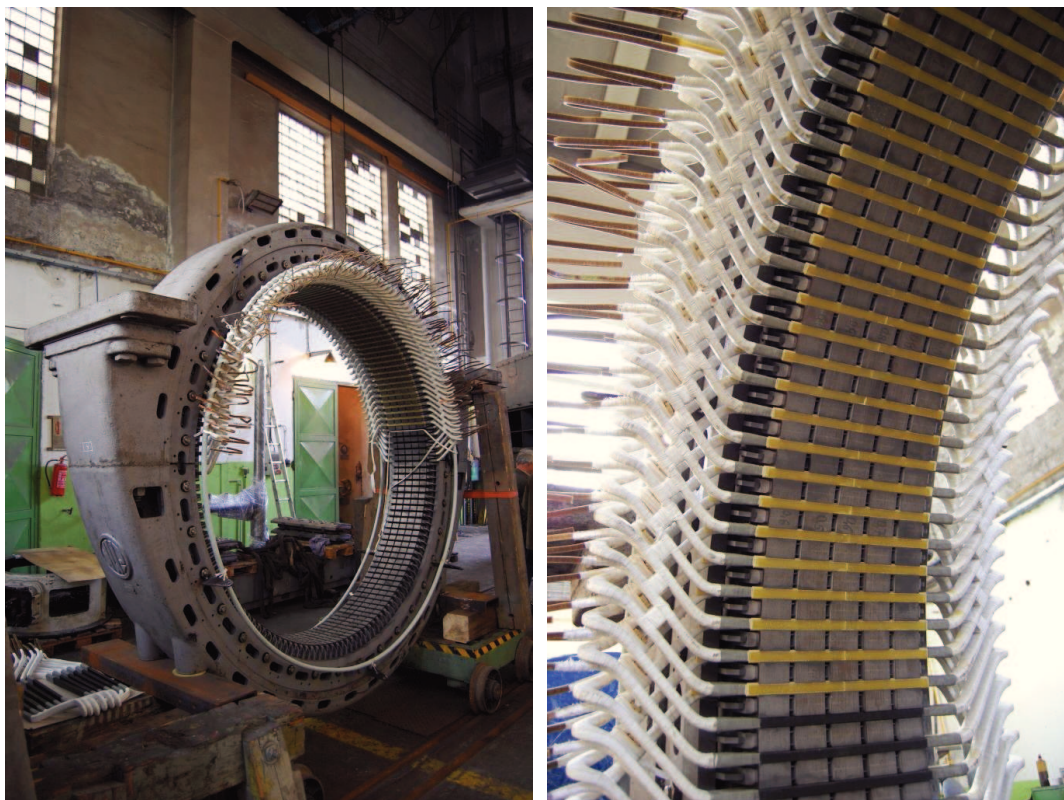
Sběrné ústrojí, skládající se z držáků kartáčů s kartáči a ze sběrných kroužků, bude umístěno stejně jako původní s tím, že všechny izolační díly budou vyrobeny nové ze sklotextitu. Dále pak budou dodány nové kartáče z elektrografitového materiálu a zhotoveny nové sběrné kroužky z oceli, jež budou přes izolovaný kruh připevněny na hřídel generátoru.

Nátěry budou voleny dle korozních tříd a budou provedeny v místě opravy, poslední vrstva se bude aplikovat až v místě provozu stroje, spolu s opravami nátěrů, jež byly poškozeny během dopravy a závěrečné montáže. Na soustrojí bude zachován původní odstín – černá RAL 9005.

Pro chlazení bude použito IC 01 – jedná se o oběh volným prouděním, kde chladivo vtéká přímo do stroje z okolního prostředí, ochlazuje stroj a vrací se zpět do okolního prostředí. Jako chladivo je použit vzduch. Proudění chladiva je vyvoláno otáčením rotoru generátoru.



Magnetický obvod statoru bude segmentové konstrukce a pro jeho výrobu budou použity izotropní plechy pro elektrotechniku válcované za studena, jakosti E135 o tloušťce 0,5 mm nesoucí označení M350 – 50 A, druh oceli EN 10106. Potřebný počet kusů plechů pro výrobu magnetického obvodu je 404 a jeho normované rozměry jsou: 0,5 x 1000 x 2000. Povrchová izolace plechů – sulfizol, což je elektroizolační žáruvzdorný lak. Do vinutí statoru i magnetického obvodu navrhuji nainstalovat snímače teploty Pt 100.



*Obr.č.5 a 6 Magnetický obvod statoru a již částečně vložené vinutí*

Řešení buzení a rekonstrukce ložisek není předmětem této práce. Budič bude dodán ve formě statické (měnič s cizím napájením) a nebude již součástí konstrukce stroje.

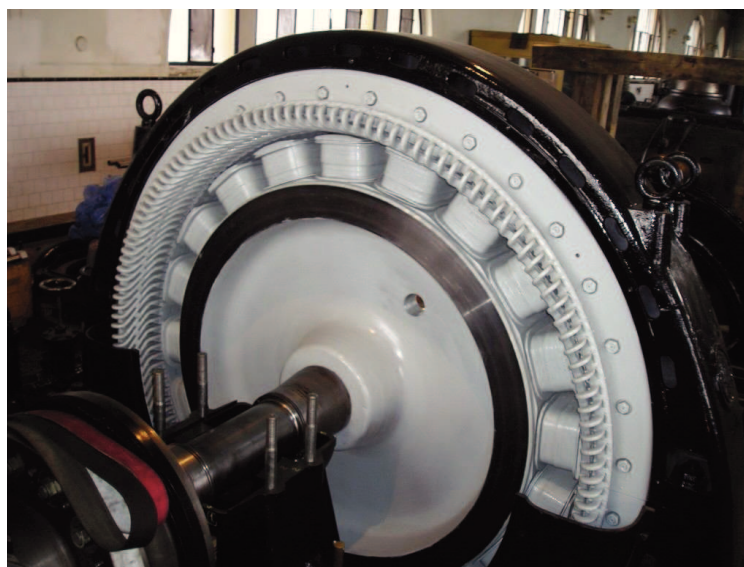
### **Technické parametry generátoru po rekonstrukci:**

|                              |                                   |
|------------------------------|-----------------------------------|
| typ generátoru               | synchronní horizontální           |
| jmenovitý činný výkon (100%) | $P_n = 765 \text{ kW}$            |
| jmenovitý zdánlivý výkon     | $S = 850 \text{ kVA}$             |
| jmenovité napětí             | $U_{nf} = 6300 \text{ V} \pm 5\%$ |
| jmenovitý proud              | $I_{nf} = 78 \text{ A}$           |
| jmenovitá frekvence          | $f = 50 \text{ Hz} \pm 2\%$       |
| účinník                      | $\cos \varphi = 0,9$              |

|                                     |  |
|-------------------------------------|--|
| jmenovité otáčky                    | $n = 300 \text{ min}^{-1}$                               |
| průběžné otáčky                     | $n_p = 600 \text{ min}^{-1}$ ( předpokládaná hodnota )   |
| smysl otáčení                       | proti směru hodinových ručiček při pohledu od převodovky |
| buzení                              | statické   |
| účinnost                            | $\eta = 93,8 \%$   |
| spojení statoru                     | Y  |
| počet vývodů statoru                | 6 svorek   |
| maximální hladina akustického tlaku | $L_{Aeq} \leq 85 \text{ dB (A)}$                         |
| tolerance vzduchové mezery          | max. $\pm 10\%$ jmenovité hodnoty                        |
| snímače pro měření teplot:          |  |
| - statorové vinutí                  | 3ks dvojité Pt 100                                       |
| - statorové plechy                  | 3ks dvojité Pt 100                                       |

### Provedení stroje:

|  |  |
|--|--|
| - krytí                                  | IP 23 dle ČSN EN 60034-5 (IEC 34-5)  |
| - chlazení                               | IC 01 dle ČSN EN 60034-6 (IEC 34-6)  |
| - třída izolace                          | stator, rotor F  |
| - oteplení                               | stator, rotor B  |
| - makroklimatická oblast                 | WT (všeobecné klimatické provedení – musí splňovat podmínky pro všechny oblasti) |
| - umístění stroje                        | uzavřená strojovna   |
| - typ atmosféry                          | průmyslová   |
| - teplota okolí                          | max. $40^{\circ}\text{C}$  |
| - nadmořská výška                        | do 1000 m  |
| - relativní vlhkost vzduchu              | max. 80 %  |
| - přípustné množství nečistot ve vzduchu | max. $0,5 \text{ mg/m}^3$  |
| - provedení z hlediska výbušnosti        | prostředí normální EN 50016-6 (IEC 79-0)   |



Obr.č.7 Provedení generátoru po rekonstrukci

## 4 Návrh statorového vinutí

Původní vinutí statoru bylo provedeno jako všívané. Z tohoto důvodu jsem navrhl nový magnetický obvod s paralelní drážkou tvaru N dle ON 35 0868. Při výpočtech jsem vycházel z naměřených rozměrů stroje.

### Parametry pro výpočet:

|                                    |                        |
|------------------------------------|------------------------|
| počet drážek                       | $Q_1 = 144$            |
| počet paralelních větví volím      | $a = 1$                |
| počet pólových dvojic              | $p = 10$               |
| počet fází                         | $m = 3$                |
| vnitřní průměr magnetického obvodu | $D = 2212 \text{ mm}$  |
| délka magnetického obvodu          | $l = 300,5 \text{ mm}$ |

Počet drážek na pól a fázi

$$q = \frac{Q_1}{2 \cdot p \cdot m} = \frac{144}{2 \cdot 10 \cdot 3} = 2,4$$

Pólová rozteč počtu drážek

$$Q_p = \frac{Q_1}{2 \cdot p} = \frac{144}{2 \cdot 10} = 7,2$$

Volba kroku vinutí

$$y_{1d5} = \left(1 \pm \frac{1}{r}\right) \cdot Q_p = \left(1 - \frac{1}{5}\right) \cdot 7,2 = 5,76$$

$r$  – označení harmonické

Znaménko (+) znamená prodloužený krok, (-) znamená zkrácený krok.

Volím  $y_{1d} = 6$  s ohledem na potlačení větší části páté harmonické.

$$y_1 = 2 \cdot y_{1d} + 1 = 2 \cdot 6 + 1 = 13 \quad \text{pak zadní cívková strana je: } 1+13$$



Proud v jedné fázi

$$I_{nf} = \frac{S}{U_s \cdot \sqrt{3}} = \frac{850}{6,3 \cdot \sqrt{3}} = 77,89 A \cong 78 A$$

## 4.1 Výpočet průřezu vodiče statorového vinutí


Volím proudovou hustotu  $\sigma_1 = 3,57 \frac{A}{mm^2}$  s ohledem na vhodné vyplnění drážky.

$$S_{V1} = \frac{I_{nf}}{\sigma_1} = \frac{78}{3,57} = 21,85 mm^2$$

volím šířku vodiče  $\check{s} = 10 \text{ mm}$

$$\text{předběžná tloušťka vodiče} \quad t = \frac{S_{V1}}{\check{s}} = \frac{21,85}{10} = 2,185 mm \Rightarrow 2,24 mm$$

Volím tedy vodič:

**OLIK-2**  **2,24 / 2,7 x 10,0 / 10,46**

Označení **OLIK-2** – měděný vodič izolovaný vytvrzovacím lakem na bázi polyesterimidu a opředený skelnou tkaninou impregnovanou elektroizolačním lakem. (celková tloušťka izolace 0,46 mm).

Počet závitů v jedné fázi v sérii :  $N_1$

$$U_{nf} = 4,44 \cdot f \cdot \Phi \cdot N_1 \cdot k_v \quad \Rightarrow \quad N_1 = \frac{U_{nf}}{4,44 \cdot f \cdot \Phi \cdot k_v}$$

Činitel zkrácení kroku

$$k_{1k} = \sin \cdot \left( \frac{y_{1d}}{Q_p} \cdot \frac{\pi}{2} \right) = \sin \cdot \left( \frac{6}{7,2} \cdot 90 \right) = 0,966$$

Činitel rozlohy statorového vinutí

$$k_{1r} = \frac{\sin(\nu \cdot \frac{\pi}{2 \cdot m})}{c \cdot q \cdot \sin(\nu \cdot \frac{\pi}{2 \cdot c \cdot m \cdot q})} = \frac{\sin(1 \cdot \frac{\pi}{6})}{5 \cdot 2,4 \cdot \sin(1 \cdot \frac{\pi}{72})} = \frac{0,5}{12 \cdot 0,0436} = 0,956$$

Nejbližší celé číslo volím:  $c = 5$

Celkový činitel statorového vinutí pro první harmonickou a zkrácený krok 6

$$k_v = k_{1k} \cdot k_{1r} = 0,966 \cdot 0,956 = 0,923$$

$$S = \frac{D \cdot l}{p} = \frac{2,212 \cdot 0,3005}{10} = 0,0664 m^2$$

Volím indukci ve vzduchové mezeře  $B_0 = 0,617 T$

$$\Phi = B_0 \cdot S = 0,617 \cdot 0,0664 = 0,041 Wb = 41 mWb$$

$$N_1 = \frac{\frac{U_s}{\sqrt{3}}}{4,44 \cdot f \cdot \Phi \cdot k_v} = \frac{\frac{6300}{\sqrt{3}}}{4,44 \cdot 50 \cdot 0,041 \cdot 0,923} = 432$$

Celkový počet cívek ve stroji je roven počtu drážek:  $N_{\text{civek}} = Q_1 = 144$

Na jednu fázi

$$\frac{Q_1}{m} = \frac{144}{3} = 48$$

Počet závitů v jedné cívce ve fázi

$$\frac{N_1}{48} = \frac{432}{48} = 9$$

Poměrné zkrácení kroku

$$\varepsilon = \frac{y_{1d}}{Q_p} = \frac{6}{7,2} = 0,833$$

## 4.2 Tingleyho schéma vinutí

Jedná se o tabelární schéma vinutí, které se provádí téměř výhradně pro zlomkové vinutí. Počet buněk v jednom řádku je roven součinu  $Q_p$  a 5  $\Rightarrow$  vyjde nejbližší celé číslo.

$$Q_p \cdot 5 = 7,2 \cdot 5 = 36$$

$$Q_p = 180^\circ [\text{el}]$$

Počet řádků je roven počtu pólů ( $2p = 20$ ) a jeden řádek je rozdělen na 3 fáze po úsecích  $60^\circ [\text{el}]$

Statorové vinutí bude tedy dvojvrstvé, zlomkové s cívkami stejného kroku a zapojené do hvězdy s vyvedenou nulou. Cívkové skupiny jsou spojeny smyčkově. Začátky vinutí jsou u dna drážky, konce u otvoru drážky.

Grafické znázornění Tingleyho schématu je uvedeno v **příloze č. 1**, schéma statorového vinutí pak na **výkrese č. E 04**.

[1], [2], [3], [4]

## 5 Elektromagnetický výpočet

### 5.1 Výpočet rozměrů statoru

|                                       |                                 |
|---------------------------------------|---------------------------------|
| vnitřní průměr magnetického obvodu    | $D = 2212 \text{ mm}$           |
| vnější průměr magnetického obvodu     | $D_e = 2510 \text{ mm}$         |
| délka magnetického obvodu             | $l = 256,5 \text{ mm}$          |
| velikost vzduchové mezery v ose pólu: | $\delta = 10 \text{ mm}$        |
|                                       | $\delta_{\max} = 16 \text{ mm}$ |
| šířka radiálního kanálu               | $b_{s1} = 11 \text{ mm}$        |
| počet radiálních kanálů               | $n_{s1} = 4$                    |
| délka oblouku pólu                    | $b_p = 233 \text{ mm}$          |

Magnetický obvod statoru je rozdělen radiálními kanály na pět svazků. Jeden svazek má 101 vrstev a jednu vrstvu tvoří 12 segmentů  $\Rightarrow$  1212 segmentů v jednom svazku, 6060 segmentů pro celý magnetický obvod. Vzhledem k radiálním větracím kanálům není magnetická vodivost vzduchové mezery v axiálním směru konstantní. Proto zavádíme ideální délku magnetického obvodu statoru  $l_i$ .

$$k_e = \frac{\frac{b_{s1}}{\delta}}{5 + \frac{b_{s1}}{\delta}} = \frac{\frac{11}{10}}{5 + \frac{11}{10}} = 0,18$$

Ideální délka mag. obvodu statoru

$$l_i = l + n_{s1} \cdot b_{s1} \cdot (1 - k_e) + 2 \cdot \delta = 256,5 + 4 \cdot 11 \cdot (1 - 0,18) + 2 \cdot 10 = 312,58 \text{ mm}$$

Čistá délka mag. obvodu statoru

$$l_e = l \cdot k_{Fe} = 256,5 \cdot 0,97 = 248,8 \text{ mm}$$

$k_{Fe}$  – činitel plnění pro plechy statoru jsem určil z návrhů podobných strojů

Pólová rozteč na vrtání statoru

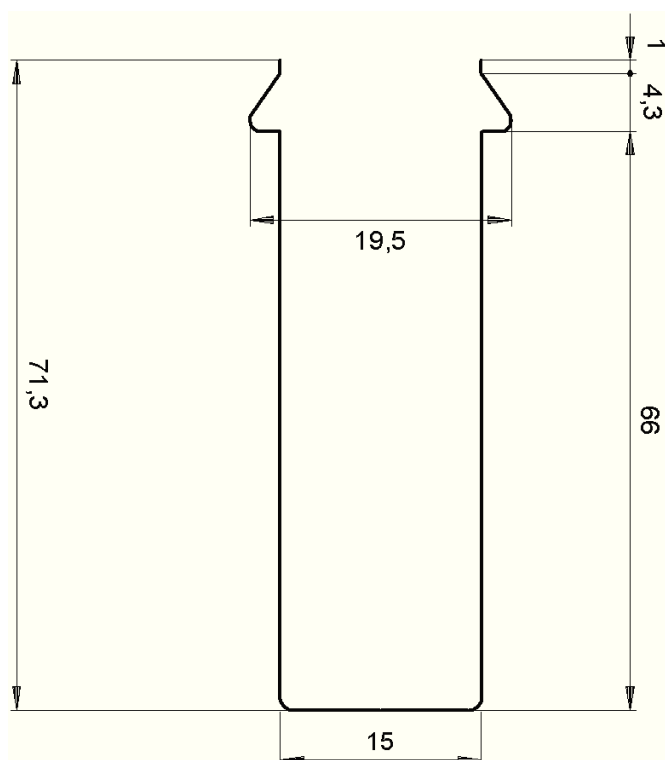
$$\tau_p = \frac{\pi \cdot D}{2 \cdot p} = \frac{\pi \cdot 2212}{2 \cdot 10} = 347,46 \text{ mm}$$

Celková délka magnetického obvodu statoru

$$L = l + n_{s1} \cdot b_{s1} = 256,5 + 4 \cdot 11 = 300,5 \text{ mm}$$

## 5.2 Drážka statoru

Volím drážku N o rozměrech viz. **obr. č.8**



Obr. č.8 Drážka statoru

$$h_0 = 1 \text{ mm}$$

$$h_1 = 4,3 \text{ mm}$$

$$h_2 = 66 \text{ mm}$$

$$h_3 = 19,5 \text{ mm}$$

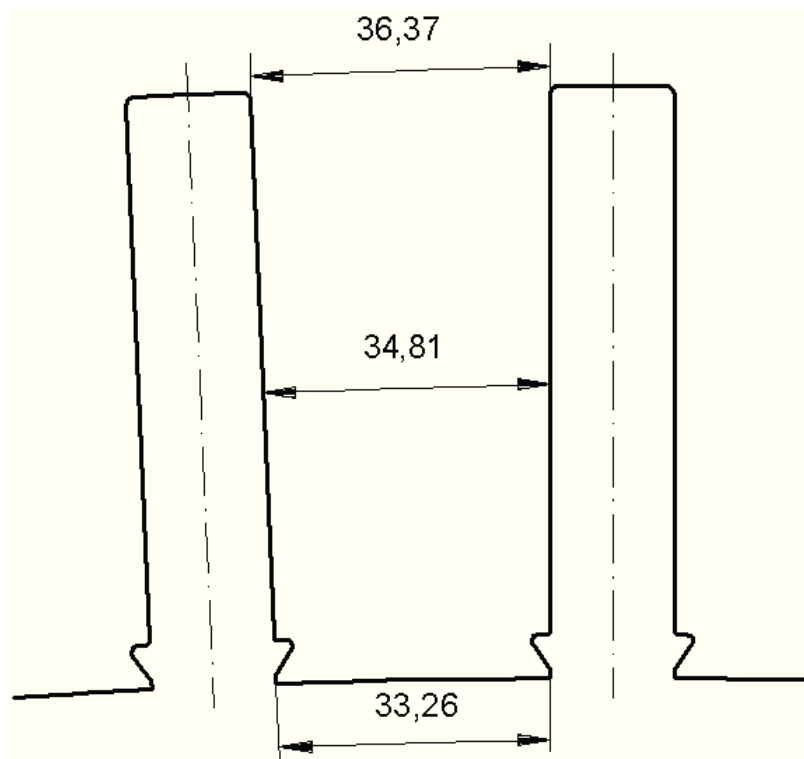
$$b_0 = 15 \text{ mm}$$

$$h_{d1} = 71,3 \text{ mm}$$

Výška drážky

$$h_{d1} = h_0 + h_1 + h_2 = 1 + 4,3 + 66 = 71,3 \text{ mm}$$

### 5.3 Zub statoru



Obr. č.9 Zub statoru

$$b_{z1} = 33,26 \text{ mm}$$

$$b_{z2} = 34,81 \text{ mm}$$

$$b_{z3} = 36,37 \text{ mm}$$

Vzhledem k tomu, že zub není v případě zvolené drážky paralelní, je nutné určit rozměry ve třech bodech.

Průměry kružnic ve třech zvolených bodech zubu

$$D_{z1} = D = 2212 \text{ mm}$$

$$D_{z2} = D + h_{d1} = 2212 + 71,3 = 2283,3 \text{ mm}$$

$$D_{z3} = D + 2 \cdot h_{d1} = 2212 + 2 \cdot 71,3 = 2354,6 \text{ mm}$$

Rozteč drážky v těchto bodech

$$t_{z1} = \frac{\pi \cdot D_{z1}}{Q} = \frac{\pi \cdot 2212}{144} = 48,26 \text{ mm}$$

$$t_{z2} = \frac{\pi \cdot D_{z2}}{Q} = \frac{\pi \cdot 2283,3}{144} = 49,81 \text{ mm}$$

$$t_{z3} = \frac{\pi \cdot D_{z3}}{Q} = \frac{\pi \cdot 2354,6}{144} = 51,37 \text{ mm}$$

Šířky zubu ve zvolených bodech

$$b_{z1} = t_{z1} - b_0 = 48,26 - 15 = 33,26 \text{ mm}$$

$$b_{z2} = t_{z2} - b_0 = 49,81 - 15 = 34,81 \text{ mm}$$

$$b_{z3} = t_{z3} - b_0 = 51,37 - 15 = 36,37 \text{ mm}$$

Skutečná magnetická indukce v zubu je nižší, protože jeho část prochází paralelně drážkou. Tento jev respektujeme pomocí korekčního činitele. Korekce se projeví až od sycení 1,8T.

Korekční činitele pro určení skutečné indukce ve zvolených bodech

$$k_{z1} = \frac{l_i \cdot t_{z1}}{l \cdot k_{Fe} \cdot b_{z1}} - 1 = \frac{0,31258 \cdot 0,04826}{0,2565 \cdot 0,97 \cdot 0,03326} - 1 = 0,823$$

$$k_{z2} = \frac{l_i \cdot t_{z2}}{l \cdot k_{Fe} \cdot b_{z2}} - 1 = \frac{0,31258 \cdot 0,04981}{0,2565 \cdot 0,97 \cdot 0,03481} - 1 = 0,798$$

$$k_{z3} = \frac{l_i \cdot t_{z3}}{l \cdot k_{Fe} \cdot b_{z3}} - 1 = \frac{0,31258 \cdot 0,05137}{0,2565 \cdot 0,97 \cdot 0,03637} - 1 = 0,774$$

Délka indukční čáry v zubu

$$l_z = h_{d1} = 71,3 \text{ mm}$$

## 5.4 Charakteristika naprázdno

Materiál použitý pro výrobu statorových plechů má jakost Ei 35 a nese označení M350 – 50 A, EN 10106 a jeho maximální měrné ztráty jsou :  $P_{1,0T/50Hz} = 1,5 \text{ W/kg}$  . Magnetovací amplitudová charakteristika těchto plechů je uvedena v **příloze č. 2**.

Fázové napětí

$$U_{nf} = \frac{U_s}{\sqrt{3}} = \frac{6300}{\sqrt{3}} = 3637,3V$$

Magnetický tok v ose pólu

$$\Phi = \frac{U_{nf} \cdot k}{4,44 \cdot k_{vl} \cdot f \cdot N_{s1}} = \frac{3637,3 \cdot 1,052}{4,44 \cdot 0,923 \cdot 50 \cdot 432} = 0,0432Wb$$

Zohlednění úbytku napětí

$$k = (1 + 0,12 \cdot \sin \varphi) = (1 + 0,12 \cdot 0,436) = 1,052$$

Magnetická indukce ve vzduchové mezeře

$$B_1 = \frac{p \cdot \Phi}{l_i \cdot D} = \frac{10 \cdot 0,0432}{312,58 \cdot 10^{-3} \cdot 2,212} = 0,625T$$

Výška jha statoru

$$h_{js} = \frac{D_e - D_{z3}}{2} = \frac{2510 - 2354,6}{2} = 77,7mm$$

Délka indukční čáry ve jhu statoru

$$l_{js} = \frac{\pi \cdot (D_{z3} + h_{js})}{4 \cdot p} = \frac{\pi \cdot (2354,6 + 77,7)}{4 \cdot 10} = 191mm$$

Velikost poměrného pólového oblouku

$$\alpha = \frac{b_p}{\tau_p} = \frac{233}{347,46} = 0,67$$



$b_p = 233 \text{ mm}$  – délka oblouku pólu (změřena na stroji)

Činitel tvaru základní harmonické

$$C_1 = \frac{4}{\pi} \cdot \sin\left(\alpha \cdot \frac{\pi}{2}\right) = \frac{4}{\pi} \cdot \sin\left(0,67 \cdot \frac{\pi}{2}\right) = 1,106$$

Skutečná magnetická indukce

$$B_\delta = \frac{B_1}{C_1} = \frac{0,625}{1,106} = 0,565 T$$

Střední velikost vzduchové mezery

$$\delta' = \delta + \frac{1}{3} \cdot (\delta_{\max} - \delta) = 10 + \frac{1}{3} \cdot (16 - 10) = 12 \text{ mm}$$

Vzhledem k tomu, že oblouky vrtání statoru a pólového nástavce nejsou soustředné, má stroj sinusovou vzduchovou mezeru. Vzduchová mezera se od středu pólu zvětšuje a na kraji pólového nástavce má hodnotu  $\delta_{\max}$ .

Carterův činitel pro stator – respektuje nárůst magnetické indukce a tím i magnetického napětí vzduchové mezery nad hlavami zubů.

$$k_{c1} = \frac{t_{z1}}{t_{z1} - \frac{b_0^2}{b_0 + 5 \cdot \delta'}} = \frac{48,26}{48,26 - \frac{15^2}{15 + 5 \cdot 12}} = 1,066$$

Magnetické napětí pro vzduchovou mezeru

$$F_\delta = \frac{1}{\mu_0} \cdot B_\delta \cdot \delta \cdot k_{c1} = \frac{1}{\mu_0} \cdot 0,565 \cdot 0,01 \cdot 1,066 = 4793 A$$

Magnetická indukce ve jhu statoru

$$B_{js} = \frac{\Phi}{h_{js} \cdot 2 \cdot l \cdot k_{Fe}} = \frac{0,0432}{0,0777 \cdot 2 \cdot 0,2565 \cdot 0,97} = 1,117 T$$

Intenzita magnetického pole odečtená z charakteristiky plechů Ei 35 viz. **příloha č. 2**

$$H_{js} = 438 A \cdot m^{-1}$$

Magnetické napětí pro jho statoru

$$F_{js} = H_{js} \cdot l_{js} = 438 \cdot 0,191 = 83,66 A$$

Zdánlivá magnetická indukce ve třech zvolených bodech zubů

$$B_{z1}' = \frac{l_i \cdot t_{z1}}{l \cdot k_{Fe} \cdot b_{z1}} \cdot B_{\delta} = \frac{0,3126 \cdot 0,04826}{0,2565 \cdot 0,97 \cdot 0,03326} \cdot 0,565 = 1,0299 T \Rightarrow B_{z1} = 1,0299 T$$

$$B_{z2}' = \frac{l_i \cdot t_{z2}}{l \cdot k_{Fe} \cdot b_{z2}} \cdot B_{\delta} = \frac{0,3126 \cdot 0,04981}{0,2565 \cdot 0,97 \cdot 0,03481} \cdot 0,565 = 1,016 T \Rightarrow B_{z2} = 1,016 T$$

$$B_{z3}' = \frac{l_i \cdot t_{z3}}{l \cdot k_{Fe} \cdot b_{z3}} \cdot B_{\delta} = \frac{0,3126 \cdot 0,05137}{0,2565 \cdot 0,97 \cdot 0,03637} \cdot 0,565 = 1,003 T \Rightarrow B_{z3} = 1,003 T$$

Intenzita magnetického pole (charakteristika viz. **příloha č. 2**)

$$H_{z1} = 343 A \cdot m^{-1}$$

$$H_{z2} = 329 A \cdot m^{-1}$$

$$H_{z3} = 316 A \cdot m^{-1}$$

Střední hodnota intenzity magnetického pole určená pomocí Simpsonova pravidla

$$H_{zstř.} = \frac{1}{6} \cdot (H_{z1} + 4 \cdot H_{z2} + H_{z3}) = \frac{1}{6} \cdot (343 + 4 \cdot 329 + 316) = 329 A \cdot m^{-1}$$

Magnetické napětí pro zuby statoru

$$F_z = H_{zstř.} \cdot l_z = 329 \cdot 0,0713 = 23 A$$

Magnetické napětí pro vzduchovou mezeru, zuby a jho statoru

$$F_{\delta zj} = F_{\delta} + F_z + F_{js} = 4792,87 + 23 + 83,66 = 4899,53 A$$

Rozptylová magnetická vodivost mezi póly – zahrnuje vodivost mezi boky pólů, boky nástavců, čely nástavců a čely pólů. Všechny cesty jsou řazeny paralelně, tudíž lze jejich vodivosti sčítat.

$$\tau_p' = \frac{\pi}{2 \cdot p} \cdot \left[ D - 2 \cdot \left( \delta + h_n + \frac{h_p}{2} \right) \right] = \frac{\pi}{2 \cdot 10} \cdot \left[ 2212 - 2 \cdot \left( 10 + 29,4 + \frac{155}{2} \right) \right] = 310,7 mm$$

$$\Lambda_p = 4 \cdot \mu_0 \cdot \left[ \frac{L_n \cdot h_n}{\tau_p - s_n} + \frac{L_p \cdot h_p}{2 \cdot (\tau_p' - s_p)} + \frac{2 \cdot h_n}{\pi} \cdot \ln \left( 1 + \frac{\pi \cdot s_n}{2 \cdot (\tau_p - s_n)} \right) + \right. \\ \left. + \frac{h_p}{\pi} \cdot \ln \left( 1 + \pi \cdot \frac{s_p}{2 \cdot (\tau_p' - s_p)} \right) \right]$$

$$\Lambda_p = 4 \cdot \mu_0 \cdot \left[ \frac{0,34 \cdot 0,0294}{0,3474 - 0,253} + \frac{0,28 \cdot 0,155}{2 \cdot (0,3107 - 0,168)} + \right. \\ \left. + \frac{2 \cdot 0,0294}{\pi} \cdot \ln \left( 1 + \frac{\pi \cdot 0,253}{2 \cdot (0,3474 - 0,253)} \right) + \right. \\ \left. + \frac{0,155}{\pi} \cdot \ln \left( 1 + \pi \cdot \frac{0,168}{2 \cdot (0,3107 - 0,168)} \right) \right]$$

$$\Lambda_p = 1,709 \cdot 10^{-6} H$$

Průřez pólu

$$S_p = \left( \frac{l_p}{2} \right)^2 \cdot \pi = \left( \frac{0,28}{2} \right)^2 \cdot \pi = 0,0615 m^2$$

Délka indukční čáry v pólu

$$h_{pn} = h_p + h_n = 155 + 29,4 = 184,4 mm$$

Rozptylový magnetický tok

$$\Phi_s = \Lambda_p \cdot F_{\Sigma j} = 1,709 \cdot 10^{-6} \cdot 4899,53 = 0,0084 Wb$$

Tok procházející pólem

$$\Phi_p = \Phi + \Phi_s = 0,043 + 0,0084 = 0,0514 Wb$$

Magnetická indukce v pólu

$$B_p = \frac{\Phi_p}{S_p} = \frac{0,0514}{0,0615} = 0,836 T$$

Intenzita magnetického pole v pólu (odečtena z magnetizační charakteristiky pro ocelolitinu – viz. **příloha č. 3**)

$$H_p = 650 \text{ A} \cdot \text{m}^{-1}$$

Magnetické napětí pro pól a nástavec

$$F_p = H_p \cdot (h_p + 0,01) = 650 \cdot (0,155 + 0,01) = 107,25 \text{ A}$$

Výška jha rotoru (změřena na stroji)

$$h_{jr} = 153,3 \text{ mm}$$

Délka jha rotoru

$$l_{jr} = \pi \cdot \frac{D - 2 \cdot \delta - 2 \cdot h_{pn} - h_{jr}}{4 \cdot p} = \pi \cdot \frac{2212 - 2 \cdot 10 - 2 \cdot 184,4 - 153,3}{4 \cdot 10} = 131 \text{ mm}$$

Průřez jha rotoru

$$S_{jr} = l_{jr} \cdot h_{jr} = 0,131 \cdot 0,1533 = 0,0201 \text{ m}^2$$

Magnetizační indukce ve jhu rotoru

$$B_{jr} = \frac{\Phi_p}{2 \cdot S_{jr}} = \frac{0,0514}{2 \cdot 0,0201} = 1,28 \text{ T}$$

Intenzita magnetického pole ve jhu rotoru (odečtena z magnetizační charakteristiky pro ocelolitinu – viz. **příloha č. 3**)

$$H_{jr} = 1500 \text{ A} \cdot \text{m}^{-1}$$

|                               | 50%         | 80%         | 100%        | 110%        | 130%        | 150%         |
|-------------------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|--------------|
| <b>Φ[mWb]</b>                 | 21,5        | 34,4        | 43          | 47,3        | 55,9        | 64,5         |
| <b>B1[T]</b>                  | 0,3125      | 0,5         | 0,625       | 0,6875      | 0,8125      | 0,9375       |
| <b>Bδ[T]</b>                  | 0,2825      | 0,452       | 0,565       | 0,6215      | 0,7345      | 0,8475       |
| <b>Fδ[A]</b>                  | <b>2396</b> | <b>3834</b> | <b>4793</b> | <b>5272</b> | <b>6231</b> | <b>7189</b>  |
| <b>Bz1[T]</b>                 | 0,515       | 0,823       | 1,029       | 1,132       | 1,338       | 1,544        |
| <b>Bz2[T]</b>                 | 0,508       | 0,813       | 1,016       | 1,118       | 1,321       | 1,524        |
| <b>Bz3[T]</b>                 | 0,502       | 0,802       | 1,003       | 1,103       | 1,304       | 1,505        |
| <b>H<sub>z1</sub>[A/m]</b>    | 130         | 210         | 343         | 462         | 1035        | 2957         |
| <b>H<sub>z2</sub>[A/m]</b>    | 128         | 206         | 329         | 442         | 961         | 2695         |
| <b>H<sub>z3</sub>[A/m]</b>    | 127         | 201         | 316         | 422         | 887         | 2434         |
| <b>H<sub>zstř.</sub>[A/m]</b> | 128         | 206         | 329         | 442         | 961         | 2695         |
| <b>F<sub>z</sub>[A/m]</b>     | 9           | 15          | 23          | 32          | 69          | 192          |
| <b>B<sub>js</sub>[T]</b>      | 0,5585      | 0,8936      | 1,117       | 1,2287      | 1,4521      | 1,6755       |
| <b>H<sub>js</sub>[A/m]</b>    | 140         | 240         | 438         | 644         | 1806        | 6129         |
| <b>F<sub>js</sub>[A]</b>      | 26,7        | 45,8        | 83,7        | 123         | 345         | 1171         |
| <b>Fδ<sub>zj</sub>[A]</b>     | <b>2432</b> | <b>3895</b> | <b>4900</b> | <b>5427</b> | <b>6644</b> | <b>8552</b>  |
| <b>Φ<sub>s</sub>[mWb]</b>     | 4,16        | 6,66        | 8,37        | 9,27        | 11,35       | 14,62        |
| <b>Φ<sub>p</sub>[mWb]</b>     | 25,66       | 41,06       | 51,37       | 56,57       | 67,25       | 79,12        |
| <b>B<sub>p</sub>[T]</b>       | 0,417       | 0,668       | 0,835       | 0,920       | 1,094       | 1,286        |
| <b>H<sub>p</sub>[A/m]</b>     | 430         | 580         | 650         | 770         | 1040        | 1550         |
| <b>F<sub>p</sub>[A]</b>       | 70,95       | 95,7        | 107,25      | 127,05      | 171,6       | 255,75       |
| <b>B<sub>jr</sub>[T]</b>      | 0,64        | 1,02        | 1,28        | 1,41        | 1,67        | 1,97         |
| <b>H<sub>jr</sub>[A/m]</b>    | 575         | 900         | 1500        | 2200        | 6300        | 29350        |
| <b>F<sub>jr</sub>[A]</b>      | 75,325      | 117,9       | 196,5       | 288,2       | 825,3       | 3844,85      |
| <b>F<sub>0</sub>[A]</b>       | <b>2579</b> | <b>4108</b> | <b>5204</b> | <b>5842</b> | <b>7641</b> | <b>12653</b> |

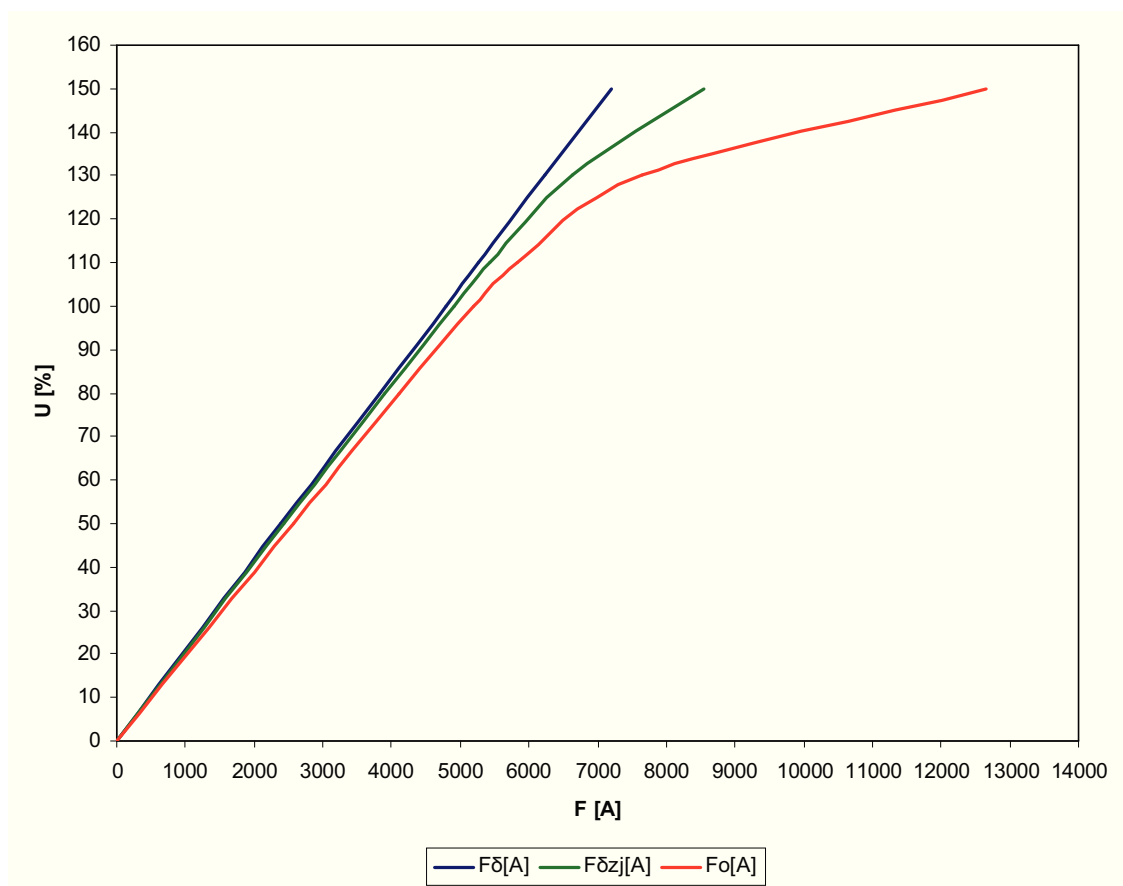
Tab.1 Vypočtené hodnoty charakteristiky naprázdno pro 50 až 150%  $U_n$

Magnetické napětí pro jho rotoru

$$F_{jr} = H_{jr} \cdot l_{jr} = 1500 \cdot 0,131 = 196,5 A$$

Celkové magnetické napětí pro 100% jmenovitého napětí a chod naprázdno

$$F_0 = F_{\delta zj} + F_p + F_{jr} = 4899,53 + 107,25 + 196,5 = 5203,28 A$$



Obr. č.10 Charakteristika naprázdno

## 5.5 Ohmický odpor statorového vinutí

Délka čela vinutí

$$l_{c1} = \frac{\pi \cdot (D + h_{d1})}{Q} \cdot \varepsilon \cdot Q_p \cdot \frac{l_c}{\tau_c} = \frac{\pi \cdot (2212 + 71,3)}{144} \cdot 0,833 \cdot 7,2 \cdot 2,3 = 687 \text{ mm}$$

poměr  $\frac{l_c}{\tau_c} = 2,3$  pro statorová vinutí s profilovanými vodiči je převzat z tabulky dle [ 3 ]

lineární extrapolací hodnot pro  $2p = 20$

Střední délka závitů statorového vinutí

$$l_{v1} = 2 \cdot (l_{c1} + L) = 2 \cdot (687 + 300,5) = 1975 \text{ mm}$$

Náhradní výška vodiče pro přídavné ztráty

$$\xi = 2 \cdot \pi \cdot a_1 \cdot \sqrt{\frac{u \cdot b_1}{b_0} \cdot \frac{f}{\rho_{115} \cdot 10^7}} = 2 \cdot \pi \cdot 2,7 \cdot 10^{-3} \cdot \sqrt{\frac{1 \cdot 10,46 \cdot 10^{-3}}{15} \cdot \frac{50 \cdot 41 \cdot 10^6}{10^7}} = 0,2028$$

počet vodičů vedle sebe

$$u = 1$$

počet vodičů nad sebou

$$g = 18$$

Činitel přídavných ztrát

$$k_{Cu} = 1 + \frac{g^2 - 0,2}{9} \cdot \xi^4 = 1 + \frac{18^2 - 0,2}{9} \cdot 0,2028^4 = 1,061$$

Činný odpor vinutí pro 115°C a 20°C

$$R_{l(115)} = \frac{\rho_{115} \cdot N_{s1} \cdot l_{v1}}{a \cdot S_{v1} \cdot n_d} \cdot k_{Cu} = \frac{\frac{1}{41} \cdot 10^{-6} \cdot 432 \cdot 1,975}{1 \cdot 22,4 \cdot 10^{-6} \cdot 1} \cdot 1,061 = 0,985 \Omega$$

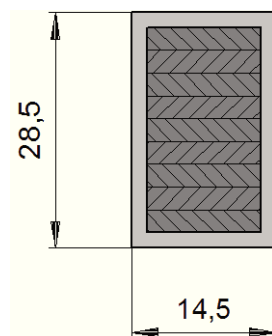
$$R_{l(20)} = \frac{\rho_{20} \cdot N_{s1} \cdot l_{v1}}{a \cdot S_{v1} \cdot n_d} \cdot k_{Cu} = \frac{\frac{1}{57} \cdot 10^{-6} \cdot 432 \cdot 1,975}{1 \cdot 22,4 \cdot 10^{-6} \cdot 1} \cdot 1,061 = 0,709 \Omega$$

## 5.6 Rozptylová reaktance statorového vinutí

Rozptylový tok se uzavírá mimo cestu hlavního magnetického toku – kolem čel statorového vinutí, mezi hlavami zubů a napříč drážkou.

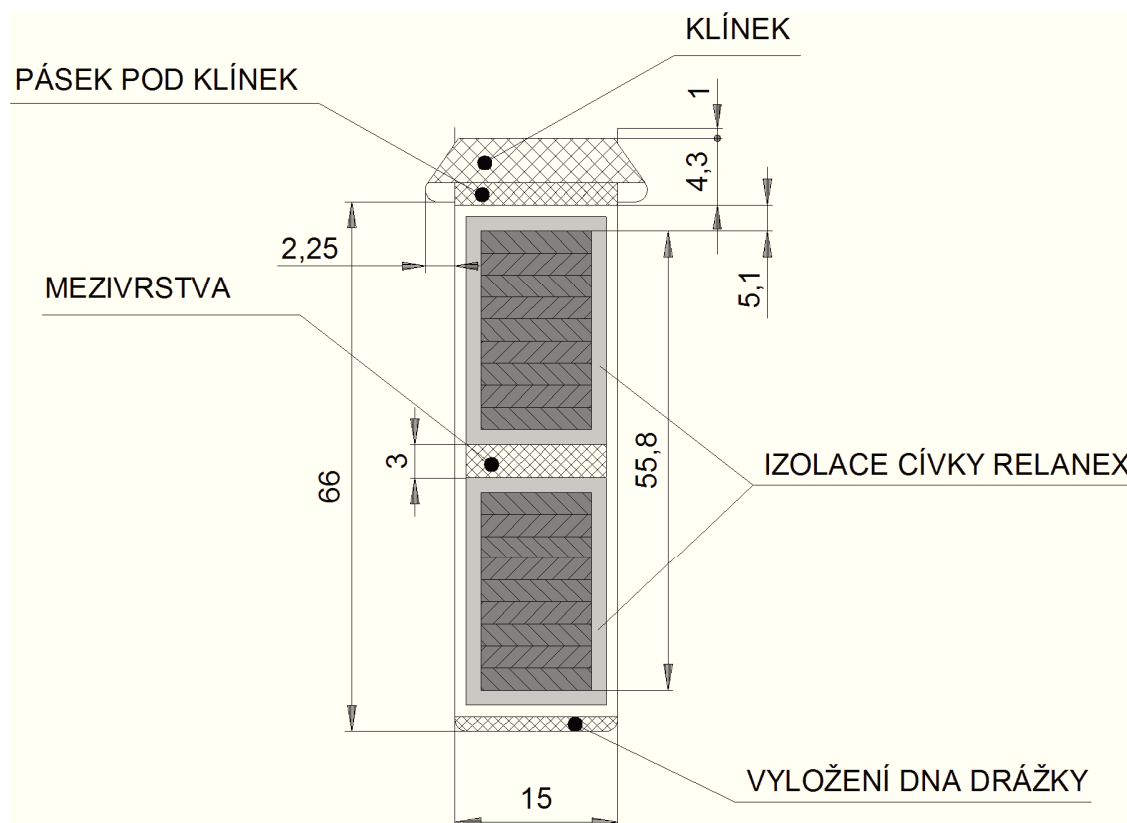
Jednotková magnetická vodivost celé drážky

$$\lambda_d = \left( \frac{h_v}{b_d} + \frac{h_c}{3 \cdot b_d} + \frac{h_0}{b_0} + \frac{2,3 \cdot k}{2 \cdot b_d + x_1} \right) = \left( \frac{5,1}{15} + \frac{55,8}{3 \cdot 15} + \frac{1}{15} + \frac{2,3 \cdot 4,3}{2 \cdot 15 + 2,25} \right) = 1,953$$



Obr. č.11 Řez cívkou

V případě dvouvrstvých vinutí se zkráceným krokem se v některých drážkách vyskytují vodiče různých fází. Rozptylový tok kolem těchto drážek je menší než v drážkách s totožnými fázemi.



Obr. č.12 Vyplnění drážky statoru

$$k = 4,3 \text{ mm}$$

$$h_0 = 1 \text{ mm}$$

$$b_0 = b_d = 15 \text{ mm}$$

$$x_1 = 2,25 \text{ mm}$$

$$h_c = 55,8 \text{ mm}$$

$$h_v = 5,1 \text{ mm}$$



Klínek, pásek pod klínek, mezivrstvu a vyložení dna drážky navrhuji zhotovit ze sklotextitu.

$b_0 = b_d \Rightarrow$  drážka je paralelní, proto jsou obě hodnoty šířky drážky stejné

Drážková vodivost při zkráceném kroku

$$\lambda_{dy} = \varepsilon \cdot \lambda_d = 0,833 \cdot 1,953 = 1,63$$

Drážková reaktance statoru vypočtená z magnetické vodivosti

$$X_{d1} = \frac{4 \cdot \pi \cdot f}{p \cdot q} \cdot N_{s1}^2 \cdot \mu_0 \cdot l_i \cdot \lambda_{dy} = \frac{4 \cdot \pi \cdot 50}{10 \cdot 2,4} \cdot 432^2 \cdot \mu_0 \cdot 0,313 \cdot 1,63 = 3,13 \Omega$$

Jednotková magnetická vodivost prostoru čel pro stroje s vyniklými póly

$$\lambda_{c1} = \sigma \cdot \left( 0,187 + 0,166 \cdot \frac{\tau_p}{l_{c1}} \cdot \varepsilon \right) = 0,95 \cdot \left( 0,187 + 0,166 \cdot \frac{347}{687} \cdot 0,833 \right) = 0,244$$

Z grafu dle [ 2 ] jsem odečetl hodnoty pro  $\varepsilon = 0,833$   
 $\sigma = 0,95$

Reaktance kolem čel vinutí

$$X_{c1} = 4 \cdot \pi \cdot f \cdot \mu_0 \cdot \frac{N_{s1}^2}{p} \cdot l_{c1} \cdot \lambda_{c1} = 4 \cdot \pi \cdot 50 \cdot \mu_0 \cdot \frac{432^2}{10} \cdot 687 \cdot 10^{-3} \cdot 0,244 = 2,47 \Omega$$

Jednotková magnetická vodivost prostoru mezi hlavami zubů

$$\lambda_{z1} = \frac{1}{\pi} \cdot \ln \left( 1 + \frac{\pi}{2} \cdot \frac{b_{z1}}{b_0} \right) = \frac{1}{\pi} \cdot \ln \left( 1 + \frac{\pi}{2} \cdot \frac{33,3}{15} \right) = 0,478$$

Reaktance rozptylu mezi hlavami zubů

$$X_{z1} = 4 \cdot \pi \cdot f \cdot \mu_0 \cdot \frac{N_{s1}^2 \cdot l_i}{p \cdot q} \cdot \lambda_{z1} = 4 \cdot \pi \cdot 50 \cdot \mu_0 \cdot \frac{432^2 \cdot 0,313}{10 \cdot 2,4} \cdot 0,478 = 0,918 \Omega$$

Celková rozptylová reaktance statorového vinutí

$$X_{1\sigma} = X_{d1} + X_{c1} + X_{z1} = 3,13 + 2,47 + 0,918 = 6,518 \Omega$$

Poměrná hodnota rozptylové reaktance

$$X_{1\sigma\%} = X_{1\sigma} \cdot \frac{I_{nf}}{U_{nf}} \cdot 100 = 6,518 \cdot \frac{78}{3637,3} \cdot 100 = 13,95\%$$

## 5.7 Reakce kotvy

Protéká-li statorovým vinutím trojfázový proud, vzniká reakční magnetické napětí, které vybudí v hlavním magnetickém obvodu reakční magnetický tok. Toto magnetické pole závisí na tvaru pólového nástavce a pólovém krytí.

Lineární proudové zatížení na obvodu vrtání statoru

$$A = \frac{2 \cdot N_{s1} \cdot m \cdot I_{nf}}{\pi \cdot D} = \frac{2 \cdot 432 \cdot 3 \cdot 78}{\pi \cdot 2,212} = 29055 \text{ A} \cdot \text{m}^{-1}$$

Reakční magnetické napětí

$$F_r = \frac{\sqrt{2}}{\pi} \cdot \tau_p \cdot A \cdot k_{v1} = \frac{\sqrt{2}}{\pi} \cdot 0,347 \cdot 29055 \cdot 0,923 = 4189 \text{ A}$$

U stroje s vyniklými póly není vzduchová mezera a s ní i magnetický odpor konstantní. Největší je v ose symetrie mezi dvěma sousedními póly, nejmenší pak v ose pólů.

Činitelé základní harmonické reakčního pole v podélném ( $C_{d1}$ ) a příčném směru ( $C_{q1}$ )

$$C_{d1} = e \cdot f = 0,805 \cdot 1,11 = 0,894$$

$$C_{q1} = g \cdot h = 1,35 \cdot 0,36 = 0,486$$

Hodnoty : e, f, g, h odečteny z grafů dle [ 2 ]

Činitel deformace pro podélné pole

$$k_d = \frac{C_{d1}}{C_1} = \frac{0,894}{1,106} = 0,808$$

Činitel deformace pro příčné pole

$$k_q = \frac{C_{q1}}{C_1} = \frac{0,486}{1,106} = 0,439$$

Činitel syčení

$$k_f = \frac{F_0}{F_\delta} = \frac{5204}{4793} = 1,086$$

Ekvivalentní vzduchová mezera

$$\delta'' = \delta \cdot k_{c1} \cdot k_f = 10 \cdot 1,066 \cdot 1,086 = 11,577 \text{ mm}$$

Rozptylová vodivost statorového vinutí

$$\Lambda_s = \left( \frac{\lambda_{dy}}{q} + \frac{l_{c1}}{l_i} \cdot \lambda_{c1} + \frac{\lambda_{z1}}{q} \right) \cdot \frac{1}{k_{v1}^2} = \left( \frac{1,63}{2,4} + \frac{0,687}{0,313} \cdot 0,244 + \frac{0,478}{2,4} \right) \cdot \frac{1}{0,923^2} = 1,66$$

Reaktance reakce kotvy v osovém směru

$$X_{rd} = 4 \cdot \pi \cdot f \cdot \mu_0 \cdot \frac{(N_{s1} \cdot k_{v1})^2}{p} \cdot l_i \cdot \frac{m}{\pi} \cdot C_{d1} \cdot \frac{D}{2 \cdot p \cdot \delta \cdot k_{c1}}$$

$$X_{rd} = 4 \cdot \pi \cdot 50 \cdot \mu_0 \cdot \frac{(432 \cdot 0,923)^2}{10} \cdot 0,313 \cdot \frac{3}{\pi} \cdot 0,894 \cdot \frac{2,212}{2 \cdot 10 \cdot 10 \cdot 10^{-3} \cdot 1,066} = 35 \Omega$$

Synchronní sycená reaktance

$$X_{su} = 4 \cdot \pi \cdot f \cdot \mu_0 \cdot \frac{(N_{s1} \cdot k_{v1})^2}{p} \cdot l_i \cdot \left[ \Lambda_s \cdot \frac{\delta \cdot k_c}{\delta''} + \frac{m}{\pi} \cdot C_{d1} \cdot \frac{D}{2 \cdot p \cdot \delta''} \right]$$

$$X_{su} = 4 \cdot \pi \cdot 50 \cdot \mu_0 \cdot \frac{(432 \cdot 0,923)^2}{10} \cdot 0,313 \cdot \left[ 1,66 \cdot \frac{10 \cdot 10^{-3} \cdot 1,066}{11,577 \cdot 10^{-3}} + \frac{3}{\pi} \cdot 0,894 \cdot \frac{2,212}{2 \cdot 10 \cdot 11,577 \cdot 10^{-3}} \right]$$

$$X_{su} = 38,05 \Omega$$

Poměrná hodnota synchronní sycené reaktance

$$X_{su\%} = X_{su} \cdot \frac{I_{nf}}{U_{nf}} \cdot 100 = 38,05 \cdot \frac{78}{3637,3} \cdot 100 = 81,5\%$$

Nesycená reaktance reakce v příčném směru

$$X_{rq} = 4 \cdot \pi \cdot f \cdot \mu_0 \cdot \frac{(N_{s1} \cdot k_{v1})^2}{p} \cdot l_i \cdot \frac{m}{\pi} \cdot C_{q1} \cdot \frac{D}{2 \cdot p \cdot \delta \cdot k_C}$$

$$X_{rq} = 4 \cdot \pi \cdot 50 \cdot 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \cdot \frac{(432 \cdot 0,923)^2}{10} \cdot 0,313 \cdot \frac{3}{\pi} \cdot 0,486 \cdot \frac{2,212}{2 \cdot 10 \cdot 10 \cdot 10^{-3} \cdot 1,066}$$

$$X_{rq} = 19\Omega$$

Poměrná hodnota nesycené reaktance reakce v příčném směru

$$X_{rq\%} = X_{rq} \cdot \frac{I_{nf}}{U_{nf}} \cdot 100 = 19 \cdot \frac{78}{3637,3} \cdot 100 = 40,7\%$$

## 5.8 Výpočet charakteristiky nakrátko

charakteristiku nakrátko určuji pro  $I_k = I_{nf} = 78A$

Magnetické napětí potřebné pro vybuzení magnetického toku odpovídajícího úbytku napětí na rozptylové reaktanci  $X_{1\sigma}$  proudem nakrátko  $I_k$  a respektující reakci kotvy:

$$F_S = I_k \cdot 2 \cdot \sqrt{2} \cdot \frac{k_{v1} \cdot N_{s1} \cdot \delta \cdot k_C \cdot \Lambda_S}{D \cdot C_1} = 78 \cdot 2 \cdot \sqrt{2} \cdot \frac{0,923 \cdot 432 \cdot 10 \cdot 10^{-3} \cdot 1,066 \cdot 1,66}{2,212 \cdot 1,106}$$

$$F_S = 635,4A$$

Budící magnetické napětí

$$F_b = F_S + F_r \cdot \frac{C_{d1}}{C_1} = 635,4 + 4189 \cdot \frac{0,894}{1,106} = 4021,4A$$

Trvalý proud nakrátko nesyceného stroje

$$I_{k\delta 0} = \frac{\pi \cdot p \cdot C_1 \cdot D \cdot B_\delta \cdot \delta \cdot k_C}{\sqrt{2} \cdot \mu_0 \cdot C_{d1} \cdot m \cdot N_{S1} \cdot k_{v1} \cdot D + 2 \cdot \sqrt{2} \cdot \mu_0 \cdot \pi \cdot N_{S1} \cdot k_{v1} \cdot \Lambda_S \cdot \delta \cdot k_C \cdot p}$$

$$I_{k\delta 0} = \frac{\pi \cdot 10 \cdot 1,106 \cdot 2,212 \cdot 0,565 \cdot 10 \cdot 10^{-3} \cdot 1,066}{\sqrt{2} \cdot \mu_0 \cdot 0,894 \cdot 3 \cdot 432 \cdot 0,923 \cdot 2,212 + 2 \cdot \sqrt{2} \cdot \mu_0 \cdot \pi \cdot 432 \cdot 0,923 \cdot 1,66 \cdot 10 \cdot 10^{-3} \cdot 1,066 \cdot 10}$$

$$I_{k\delta 0} = 92,7 A$$

Trvalý proud nakrátko při buzení pro chod naprázdno se jmenovitým napětím

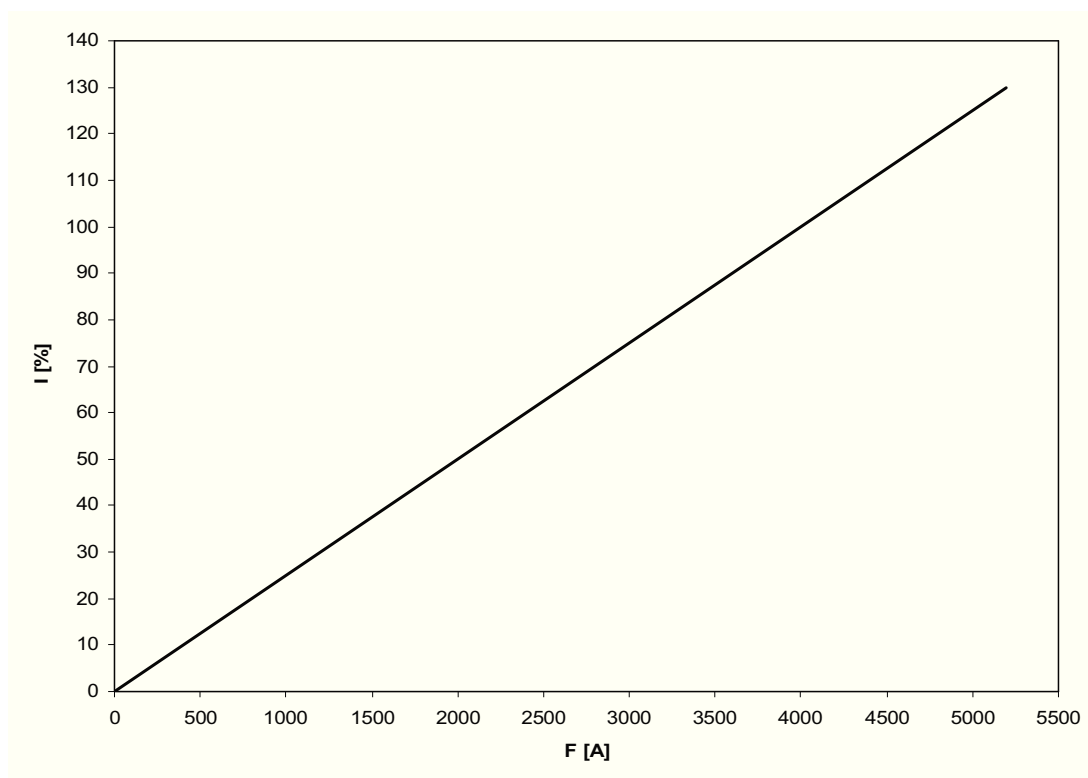
$$I_{k0} = \frac{\pi \cdot p \cdot C_1 \cdot D \cdot B_\delta \cdot \delta''}{\sqrt{2} \cdot \mu_0 \cdot C_{d1} \cdot m \cdot N_{S1} \cdot k_{v1} \cdot D + 2 \cdot \sqrt{2} \cdot \mu_0 \cdot \pi \cdot N_{S1} \cdot k_{v1} \cdot \Lambda_S \cdot \delta \cdot k_C \cdot p}$$

$$I_{k0} = \frac{\pi \cdot 10 \cdot 1,106 \cdot 2,212 \cdot 0,565 \cdot 11,577 \cdot 10^{-3}}{\sqrt{2} \cdot \mu_0 \cdot 0,894 \cdot 3 \cdot 432 \cdot 0,923 \cdot 2,212 + 2 \cdot \sqrt{2} \cdot \mu_0 \cdot \pi \cdot 432 \cdot 0,923 \cdot 1,66 \cdot 10 \cdot 10^{-3} \cdot 1,066 \cdot 10}$$

$$I_{k0} = 100,7 A$$

Zkratový poměr

$$v_k = \frac{I_{k0}}{I_{nf}} = \frac{100,7}{78} = 1,29$$



Obr. č.13 Charakteristika nakrátko

[1], [2], [3], [4]

## 6 Návrh budícího vinutí

### 6.1 Stanovení buzení

Grafické znázornění jsem provedl na základě informací z [ 2 ]

$$U_{nf} = 3637,3V \dots 100\%$$

Úbytek napětí na odporu statorového vinutí

$$R_{l(115)} \cdot I_{nf} = 0,985 \cdot 78 = 76,7V \dots 2,1\%$$

Úbytek napětí na rozptylové reaktanci

$$X_{l\sigma} \cdot I_{nf} = 6,518 \cdot 78 = 507,7V \dots 13,96\%$$

Úbytek napětí na nesyčené reaktanci v příčném směru

$$X_{rq} \cdot I_{nf} = 19 \cdot 78 = 1480V \dots 40,7\%$$

Z charakteristiky naprázdno **obr. č. 10** jsem odečetl budící napětí pro  $U_{dv} = 105\%$  zjištěné z grafické konstrukce **obr. č. 14**

$$U_{dv} = 3825V \dots 105\% \Rightarrow F_v = 5523 A$$

Magnetické napětí reakce kotvy v podélném směru

$$F_{rd} = F_r \cdot \sin \psi = 4189 \cdot \sin 0,82 = 3063 A$$

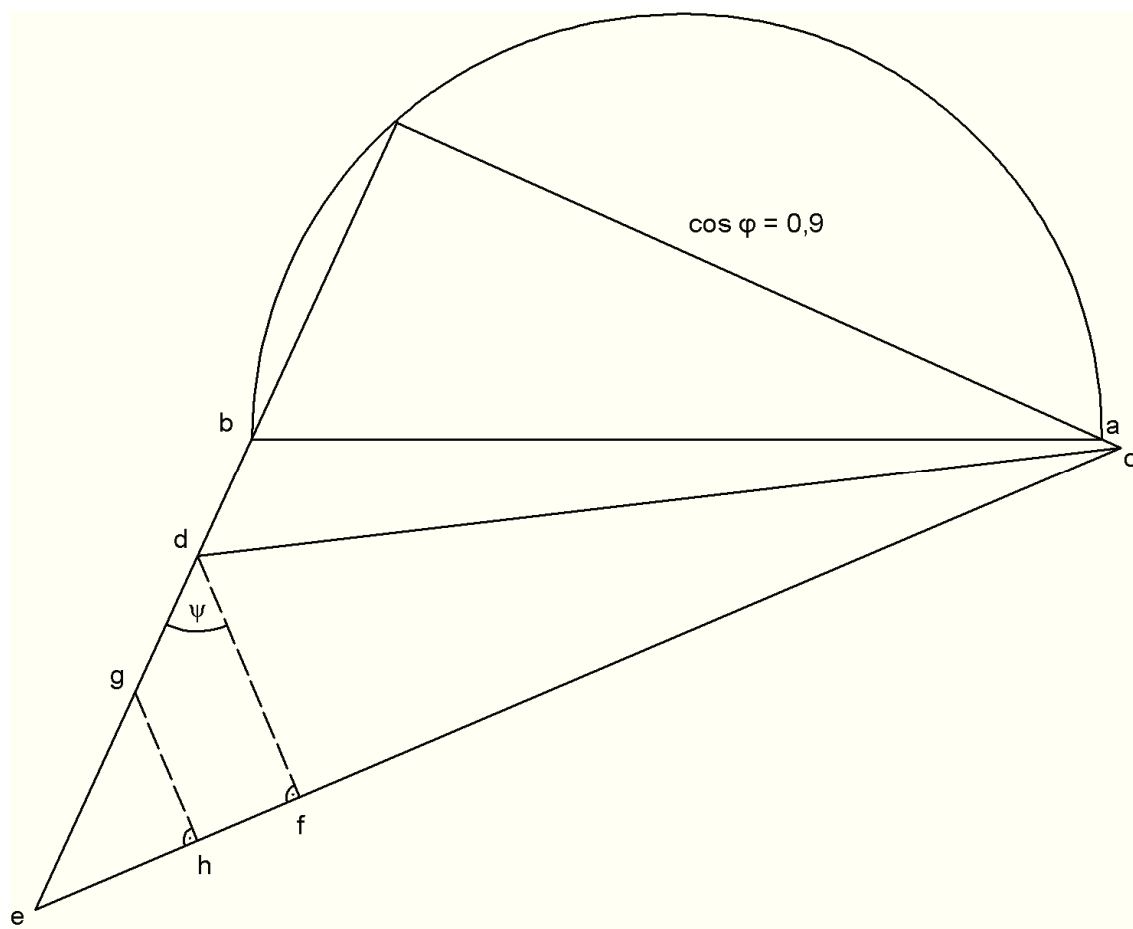
- úhel  $\psi = 0,82 \text{ rad}$  jsem odečetl z grafické konstrukce **obr.č. 14**

Složka reakčního magnetického napětí přepočtená na rotor

$$F_d' = \frac{C_{d1}}{C_1} \cdot F_{rd} = \frac{0,894}{1,106} \cdot 3063 = 2476 A$$

Budící magnetické napětí zohledňující vliv reakce kotvy

$$F_{bb} = F_v + F_d' = 5523 + 2476 = 7999 A$$



Obr. č.14 Grafická konstrukce pro určení budícího magnetického napětí stroje s vyniklými póly

$$\overline{ab} \sim U_{nf} = 3637,3V$$

$$\overline{ac} \sim R_{l(115)} \cdot I_{nf} = 76,7V$$

$$\overline{bd} \sim X_{ls} \cdot I_{nf} = 507,7V$$

$$\overline{de} \sim X_{rq} \cdot I_{nf} = 1480V$$

$$\overline{dc} \sim U_v = 3960V$$

$$\overline{cf} \sim U_{dv} = 3825V$$

$$\overline{hf} \sim F_d' = 2476 A$$

$$\overline{dg} \sim F_d = 3450 A$$

$$\psi = 47^\circ = 0,82rad$$

## 6.2 Výpočet budícího vinutí

Zvolené napětí budiče

$$U_{bn} = 115V$$

Rozměry vodiče budícího vinutí

$$a_b = 9 \text{ mm} \quad b_b = 4,5 \text{ mm} \quad \Rightarrow \quad \text{průřez vodiče: } S_b = 40,5 \text{ mm}^2$$

Volím vodič:

LLIA-2  9 / 9,2 x 4,5 / 4,7

Izolace vodiče má tloušťku: 0,2 mm

Jádro pólu a jednotlivé vrstvy vinutí budou ovinuty izolační fólií MYOFLEX o síle 0,1 mm.  
Celková velikost izolace jádra pólu je 1,5 mm.

Zvolený počet závitů na jednom pólu

$$N_b = 80$$

Budící proud

$$I_b = \frac{F_{bb}}{N_b} = \frac{7999}{80} = 100 \text{ A}$$

Zvolená proudová hustota

$$\sigma_b = 2,47 \text{ A} \cdot \text{mm}^{-2}$$

Průřez vodiče

$$S_b = \frac{I_b}{\sigma_b} = \frac{100}{2,47} = 40,486 \text{ mm}^2$$

Střední délku závitu budícího vinutí jsem změřil na stroji:

$$l_{bv} = 946,5 \text{ mm} \quad \text{k této hodnotě je nutné přičíst ještě 5\% na prostřizení materiálu} \Rightarrow \\ \Rightarrow l_{bv} = 994 \text{ mm}$$



Odpor budícího vinutí včetně spojek

$$R_b = \frac{2 \cdot p \cdot \rho_{115} \cdot N_b \cdot l_{bv}}{S_b} + \frac{\rho_{115} \cdot \pi \cdot (D - 2 \cdot (h_n + h_p)) \cdot 2}{S_b}$$

$$R_b = \frac{2 \cdot 10 \cdot \frac{1}{41} \cdot 10^{-6} \cdot 80 \cdot 0,994}{40,5 \cdot 10^{-6}} + \frac{\frac{1}{41} \cdot 10^{-6} \cdot \pi \cdot (2,212 - 2 \cdot (0,0294 + 0,155)) \cdot 2}{40,5 \cdot 10^{-6}}$$

$$R_b = 0,965 \Omega$$

Napětí na kroužcích budícího vinutí při jmenovitém zatížení

$$U_b = R_b \cdot I_b = 0,965 \cdot 100 = 96,5V$$

Činitel rezervy buzení

$$k_B = \frac{U_{bn}}{U_b + \Delta U_k} = \frac{115}{96,5 + 2} = 1,17$$

$\Delta U_k$  je úbytek na kartáč – kroužek (na kluzném kontaktu)

## 6.3 Hmotnosti aktivních částí stroje

Hmotnost zubů statoru

$$m_{z1} = 7800 \cdot l_e \cdot h_{d1} \cdot b_{z1} \cdot Q = 7800 \cdot 0,249 \cdot 0,0713 \cdot 0,0333 \cdot 144$$

$$m_{z1} = 664kg$$

Šířka zubu v jedné polovině hloubky drážky

$$b_{z1(1/2)} = \frac{\pi \cdot (D + h_{d1})}{Q} - b_{d1} = \frac{\pi \cdot (2212 + 71,3)}{144} - 15 = 34,8mm$$

Hmotnost jha statoru

$$m_{j1} = 7800 \cdot l_e \cdot \pi \cdot (D_e - h_{j1}) \cdot h_{j1} = 7800 \cdot 0,249 \cdot \pi \cdot (2,51 - 0,0777) \cdot 0,0777$$

$$m_{j1} = 1153kg$$

Efektivní průřez vodiče statorového vinutí

$$S_{ef} = n_d \cdot S_{v1} = 1 \cdot 22,4 = 22,4 \text{ mm}^2$$

Hmotnost mědi statorového vinutí

$$m_{Cu1} = \frac{8900 \cdot S_{ef} \cdot v_d \cdot Q \cdot l_{v1}}{2} = \frac{8900 \cdot 22,4 \cdot 10^{-6} \cdot 18 \cdot 144 \cdot 1,975}{2} = 510,3 \text{ kg}$$

Hmotnost mědi budícího vinutí

$$m_{Cub} = 8900 \cdot S_b \cdot l_{bv} \cdot 2 \cdot p \cdot N_b = 8900 \cdot 40,5 \cdot 10^{-6} \cdot 0,994 \cdot 2 \cdot 10 \cdot 80$$
$$m_{Cub} = 573,3 \text{ kg}$$

Hmotnost oceli pólu

$$m_p = 7800 \cdot \left[ h_p \cdot \left( \frac{l_p}{2} \right)^2 \cdot \pi + 0,8 \cdot h_n \cdot s_n \cdot L_n \right] \cdot 2 \cdot p$$
$$m_p = 7800 \cdot \left[ 0,155 \cdot \left( \frac{0,28}{2} \right)^2 \cdot \pi + 0,8 \cdot 0,0294 \cdot 0,253 \cdot 0,34 \right] \cdot 2 \cdot 10$$
$$m_p = 1805 \text{ kg}$$

Hmotnost oceli jha rotoru

$$m_{jr} = 7800 \cdot l_j \cdot \pi \cdot [D - 2 \cdot \delta - 2 \cdot (h_p + h_n) - h_{jr}] \cdot h_{jr}$$
$$m_{jr} = 7800 \cdot 0,131 \cdot \pi \cdot [2,212 - 2 \cdot 10 \cdot 10^{-3} - 2 \cdot (0,155 + 0,0294) - 0,153] \cdot 0,153$$
$$m_{jr} = 820 \text{ kg}$$

Celková hmotnost mědi

$$m_{Cu} = m_{Cu1} + m_{Cub} = 510,3 + 573,3 = 1083,6 \text{ kg}$$

Celková hmotnost aktivního železa

$$m_{Fe} = m_{z1} + m_{j1} + m_p + m_{j2} = 664 + 1153 + 1805 + 820 = 4442 \text{ kg}$$

## 6.4 Určení ztrát a účinností

Elektrické ztráty ve statoru

$$\Delta P_{j1} = m \cdot R_{l(115)} \cdot I_{nf}^2 = 3 \cdot 0,985 \cdot 78^2 = 17930 W$$

Elektrické ztráty v budícím vinutí

$$\Delta P_b = \frac{R_b \cdot I_b^2 + 2 \cdot \Delta U_k \cdot I_b}{\eta_b} = \frac{0,965 \cdot 100^2 + 2 \cdot 2 \cdot 100}{0,9} = 11167 W$$

Magnetické ztráty v železe jha statoru

$$\Delta P_{Fej} = k_{dj} \cdot \Delta P_{1,0/50} \cdot B_{js}^2 \cdot \left(\frac{f}{50}\right)^{1,3} \cdot m_{j1} = 1,1 \cdot 1,5 \cdot 1,117^2 \cdot \left(\frac{50}{50}\right)^{1,3} \cdot 1153 = 2374 W$$

Magnetické ztráty v železe zubů statoru

$$\Delta P_{Fez} = k_{dz} \cdot \Delta P_{1,0/50} \cdot B_{z2}^2 \cdot \left(\frac{f}{50}\right)^{1,3} \cdot m_{z1} = 1,5 \cdot 1,5 \cdot 1,016^2 \cdot \left(\frac{50}{50}\right)^{1,3} \cdot 664 = 1542 W$$

Obvodová rychlost rotoru

$$v = \frac{\pi \cdot D \cdot n}{60} = \frac{\pi \cdot 2,212 \cdot 300}{60} = 34,75 m \cdot s^{-1}$$

Mechanické ztráty

$$\Delta P_{mech} = 3,68 \cdot p \cdot \left(\frac{v}{40}\right)^3 \cdot \sqrt{L} \cdot 10^3 = 3,68 \cdot 10 \cdot \left(\frac{34,75}{40}\right)^3 \cdot \sqrt{0,3} \cdot 10^3 = 13216 W$$

Amplituda kolísání indukce ve vzduchové mezeře

$$B_0 = B_\delta \cdot (k_c - 1) = 0,565 \cdot (1,066 - 1) = 0,0373$$

Povrchové ztráty v pólových nástavcích

$$\Delta P_{\delta p} = 0,5 \cdot 2 \cdot p \cdot \alpha \cdot \tau_p \cdot L \cdot k_0 \cdot \left( \frac{Q \cdot n}{10000} \right)^{1,5} \cdot (B_0 \cdot t_{d1} \cdot 10^3)^2$$
$$\Delta P_{\delta p} = 0,5 \cdot 2 \cdot 10 \cdot 0,67 \cdot 0,347 \cdot 0,3 \cdot 20 \cdot \left( \frac{144 \cdot 300}{10000} \right)^{1,5} \cdot (0,0373 \cdot 0,0483 \cdot 10^3)^2$$
$$\Delta P_{\delta p} = 407 W$$

Jmenovitý činný výkon generátoru

$$P_n = m \cdot U_{nf} \cdot I_{nf} \cdot \cos \varphi = 3 \cdot 3637,3 \cdot 78 \cdot 0,9 = 765 \cdot 10^3 W$$

Dodatečné ztráty při zatížení

$$\Delta P_d = 0,005 \cdot P_n = 0,005 \cdot 765 \cdot 10^3 = 3825 W$$

Celkové ztráty generátoru při jmenovitém zatížení

$$\Delta P = \Delta P_{j1} + \Delta P_b + \Delta P_{Fej} + \Delta P_{Fez} + \Delta P_{mech} + \Delta P_{\delta p} + \Delta P_d$$
$$\Delta P = 17930 + 11167 + 2374 + 1542 + 13216 + 407 + 3825$$
$$\Delta P = 50461 W$$

Účinnost generátoru

$$\eta = 1 - \frac{\Delta P}{P_n + \Delta P} = 1 - \frac{50461}{765 \cdot 10^3 + 50461} = 0,938$$

[1], [2], [3], [4]

## 7 Závěr

Malé vodní elektrárny jsou v současné době velmi rozšířenou oblastí pro modernizaci. Hlavním důvodem je využití obnovitelných zdrojů energie. V neposlední řadě jsou uvedené modernizace podporovány výhodnou dotační politikou ze zdrojů EU. Současné výkupní ceny energií z obnovitelných zdrojů umožňují v těchto případech rychlou návratnost investic. Rekonstrukce generátorů se zachováním jejich konstrukce a s využitím nejmodernějších technologií, je vhodná zejména proto, že lze využít původní připojovací konstrukční podmínky soustrojí a zároveň v odůvodněných případech umožňuje zachovat původní vzhled stroje.

Při zachování rozměrových parametrů stroje bylo dosaženo navýšení činného výkonu o 85kW. Použitím současných izolačních materiálů v celém izolačním systému stroje, bylo z původní izolační třídy B, dosaženo vyšší izolační třídy F a generátor tak lze bezpečně provozovat za vyšších provozních teplot. Navrhovaná kvalita použitých materiálů (izolace vodičů, izotropní plechy pro elektrotechniku, impregnační laky apod.) zajišťuje dlouhou životnost a vysokou spolehlivost stroje.

Tento návrh modernizace generátoru je aplikovatelný ve všech ostatních případech srovnatelné velikosti strojů.

Jako většinový zdroj informací pro postupy výpočtů jsem čerpal z níže uvedené literatury.

## Literatura:

- [1] KOPYLOV, I. P. a kol., *Stavba elektrických strojů*, přeložil doc. Ing. Petr Voženílek, CSc., Nakladatelství Energija, Moskva, 1988, SNTL, Praha, 1988
- [2] KEPPERT, Svetozár, Prof. Ing. CSc., *Elektrické stroje – IV (Synchronní stroje)*, ediční středisko VŠB – TUO, 1985, II. vydání
- [3] KEPPERT, Svetozár, Prof. Ing. CSc., *Elektrické stroje – III (Asynchronní stroje)*, ediční středisko VŠB – TUO, 1985, II. vydání
- [4] PROVAZNÍK, František, doc. Ing. dr., *Synchronní stroje*, Technicko – vědecké vydavatelství, Praha, 1952
- [5] MEISNER, Jiří, Ing., *SchéματαCAD*, ELMER software s.r.o., číslo licence: 436775 – Jedná se o kreslicí program, ve kterém byly vytvořeny všechny výkresy a náčrty.

## **SEZNAM PŘÍLOH A VÝKRESOVÉ DOKUMENTACE:**

|                |   |   |
|----------------|---|---|
| Příloha č.1    | - | Tingleyho schéma                        |
| Příloha č.2    | - | Magnetovací amplitudová charakteristika |
| Příloha č.3    | - | Magnetizační charakteristika ocelolitin |
| Výkres č. E 01 | - | Segment magnetického obvodu statoru     |
| Výkres č. E 02 | - | Púdorys pólu rotoru                     |
| Výkres č. E 03 | - | Nárys a bokorys pólu rotoru             |
| Výkres č. E 04 | - | Schéma statorového vinutí               |